

## EFFECTO DE LA MAREA EN LA PRODUCTIVIDAD ORGÁNICA PRIMARIA EN UNA LAGUNA COSTERA DEL CANAL DE BALLENAS, GOLFO DE CALIFORNIA

### TIDAL EFFECT ON ORGANIC PRIMARY PRODUCTIVITY IN A COASTAL LAGOON OF BALLENAS CHANNEL, GULF OF CALIFORNIA

Héctor Bustos-Serrano  
Roberto Millán-Núñez  
Ramón Cajal-Medrano

Facultad de Ciencias Marinas  
Universidad Autónoma de Baja California  
Apartado postal 453  
Ensenada, Baja California, México

*Recibido en junio de 1995; aceptado en marzo de 1996*

#### RESUMEN

Se realizó un muestreo del 6 al 12 de agosto de 1986 que generó series de tiempo de productividad orgánica primaria (POP) del fitoplancton y nutrientes en una laguna costera del Golfo de California, para estimar la influencia del Canal de Ballenas durante un periodo de mareas vivas y muertas. La temperatura del agua varió entre 26 y 30°C. La salinidad tuvo una variabilidad entre 35.54 y 35.63‰. El oxígeno estuvo, por lo general, insaturado al 85%, teniendo valores de sobresaturación solo en horas lumínicas, con una tendencia a aumentar sus valores en marea muerta debido al acondicionamiento del fitoplancton al ambiente, dando una mayor fotosíntesis. La marcada insaturación hace suponer que se trata de una zona de alto consumo de oxígeno y producción de CO<sub>2</sub>. Los nutrientes (nitratos, fosfatos y silicatos), la clorofila *a* y la POP mostraron valores altos, similares a lagunas costeras del Océano Pacífico de Baja California en condiciones de surgencia. Los valores máximos de POP alcanzaron hasta 80 mgC·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup> y se presentaron en mareas muertas. Con base en los resultados de POP y el cociente fotosintético (PQ) calculado, se deduce que la fotosíntesis se sostiene principalmente de la concentración de nitratos. La razón de asimilación varió de 10 a 25 mgC·mgCl<sub>a</sub><sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> evaluada con el método de <sup>14</sup>C, siendo estos valores cercanos al máximo teórico reportado; sin embargo, con el método de oxígeno utilizando un PQ = 1.25 varió de 1.6 a 35.6 mgC·mgCl<sub>a</sub><sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> y con el PQ calculado varió de 1.0 a 7.2 mgC·mgCl<sub>a</sub><sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>. De lo anterior, se deduce que esta laguna costera recibe una influencia notoria en la variación de la concentración de nutrientes del Canal de Ballenas, principalmente nitratos y silicatos, durante los periodos de mareas vivas. Además, se observa un incremento de POP durante mareas muertas.

*Palabras clave:* cociente fotosintético, nutrientes, advección, productividad orgánica primaria.

#### ABSTRACT

Phytoplankton organic primary productivity (POP) and nutrient time series were generated in a coastal lagoon of the Gulf of California from 6 to 12 August 1986 to estimate the influence of Ballenas Channel during spring and neap tides. Ocean water temperature and salinity varied from 26 to 30°C and from 35.54 to 35.63‰, respectively. Oxygen was unsaturated at 85% in more than 70% of the data collected. Values of supersaturated oxygen were obtained during daylight hours only, which increased during neap tides due to the conditioning of the phytoplankton, resulting in greater photosynthesis. It can be inferred from the marked unsaturation that this is an area of high oxygen

consumption and CO<sub>2</sub> production. The nutrients (nitrate, phosphate and silicate), chlorophyll *a* and POP show high values, similar to coastal lagoons of the Pacific coast of Baja California in upwelling conditions. POP maximums were as high as 80 mgC·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup> in neap tides. It is deduced from the calculated photosynthetic quotient (PQ) and POP that photosynthesis is supported mainly by nitrates. Based on the <sup>14</sup>C method, the assimilation ratio varied from 10 to 25 mgC·mgChl*a*<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>. These values are close to the theoretical maximums reported; however, the assimilation ratio using the oxygen method and PQ = 1.25 varied from 1.6 to 35.6 mgC·mgChl*a*<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> and, with the calculated PQ, it varied from 1.0 to 7.2 mgC·mgChl*a*<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>. It is also deduced that this coastal lagoon is greatly influenced by the nutrient concentrations (mainly nitrate and silicate) from Ballenas Channel during spring tides. There is also an important increment of POP during neap tides.

*Key words:* photosynthetic quotient, nutrients, advection, organic primary productivity.

## INTRODUCCIÓN

Las lagunas costeras se consideran zonas con alto potencial ecológico, por las especies que albergan, y económico, por las importantes pesquerías que en ellas se desarrollan (Bruno *et al.*, 1980; UNESCO, 1983). En las lagunas de la región norte y central del Golfo de California existen escasos estudios hidrológicos y de productividad que expliquen el potencial productivo de sus aguas.

El fitoplancton es el principal productor de material orgánico en el océano (Platt *et al.*, 1989). Las algas bentónicas producen aproximadamente el 10% de la producción total del mar (Ryther, 1963). Sin embargo, recientemente, la producción bacteriana surge como tema controversial (Pomeroy, 1984), debido a que existen evidencias de que puede haber un mayor aporte bacteriano que fitoplanctónico en ambientes costeros y oceánicos (Williams, 1981; Azam *et al.*, 1983; Peterson, 1984; Painchaud y Therriault, 1989; Morales-Zamorano *et al.*, 1991).

En la parte central del Golfo de California se han reportado surgencias y mezcla debida a los amplios intervalos de marea, que incrementan la cantidad de nutrientes en la parte superior del océano, teniendo un efecto directo en la productividad (Zeitzschel, 1969).

La alta productividad orgánica primaria de las lagunas costeras del Océano Pacífico de Baja California, como la Bahía San Quintín y el Estero de Punta Banda, se ha explicado por el efecto de surgencias y de flujos y reflujos provocados por la marea (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982).

## INTRODUCTION

Coastal lagoons are considered to have high ecological and economical potential because of the species they shelter and the fisheries they sustain (Bruno *et al.*, 1980; UNESCO, 1983). There are few hydrological and productivity studies on the lagoons of the northern and central regions of the Gulf of California that explain the potential productivity of its waters.

Phytoplankton is the principal producer of organic matter in the ocean (Platt *et al.*, 1989). Benthic algae produce approximately 10% of the total production in the sea (Ryther, 1963). Bacterial production, however, has recently become a controversial subject (Pomeroy, 1984), due to the evidence of a greater bacterial, rather than phytoplanktonic, contribution in coastal environments and oceans (Williams, 1981; Azam *et al.*, 1983; Peterson, 1984; Painchaud and Therriault, 1989; Morales-Zamorano *et al.*, 1991).

Upwelling and mixing, caused by the large tidal ranges, have been reported for the central region of the Gulf of California, which increase the amount of nutrients at the ocean surface and directly affect productivity (Zeitzschel, 1969).

The high organic primary productivity in coastal lagoons of the Pacific Ocean of Baja California, such as San Quintín Bay and the Punta Banda Estuary, has been attributed to the effects of upwelling and the ebb and flow of the tide (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982).

High productivity values, greater than 350 mgC·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, have been reported for the

Para el Golfo de California se han reportado valores altos de productividad, superiores a  $350 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  (Zeitzschel, 1969). Para la Bahía de los Ángeles se han reportado valores de 1 a  $8 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  (Gilmartin y Revelante, 1978) y superiores a los  $50 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  (Canino-Herrera, 1989). En este lugar, la mezcla producida por la marea desempeña un papel importante en la zona costera (Roden, 1959). Puerto Don Juan está ubicado frente al Canal de Ballenas, donde se ha reportado una alta turbulencia y mezcla (Roden, 1959). El efecto de la mezcla, asociada con mareas, provoca un transporte de alta concentración de nutrientes a la superficie e incrementa la productividad orgánica primaria. Estos procesos son similares a los reportados en zonas con surgencia en las costas del Océano Pacífico de Baja California. Por lo anterior, resulta interesante investigar la posibilidad de que la mezcla producida en el Canal de Ballenas tenga efecto en la disponibilidad de nutrientes e incrementos en la productividad orgánica primaria del fitoplancton de esta laguna costera, durante un periodo de mareas vivas y muertas.

## ZONA DE ESTUDIO

Puerto Don Juan está ubicado en la boca sur del Canal de Ballenas, al este de Bahía de los Ángeles en el Golfo de California, entre las latitudes  $28^{\circ}56'15''$  y  $28^{\circ}57'05''\text{N}$  y longitudes  $113^{\circ}26'20''$  y  $113^{\circ}27'15''\text{O}$ . Tiene una longitud de 2.3 km, un área de  $1.7 \text{ km}^2$  y una profundidad máxima de 15 m en la boca de la laguna en pleamar (fig. 1).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó una estación fija en la boca de la laguna costera para generar series de tiempo en superficie y a 5 m de profundidad. Se emplearon botellas van Dorn de 4 litros de capacidad a intervalos de dos horas, del 6 al 12 de agosto de 1986, para medir las siguientes variables: temperatura del agua, salinidad, nutrientes (nitratos, fosfatos y silicatos), oxígeno disuelto, pigmentos fotosintéticos, pH y alcalinidad total e irradiancia durante horas luz. Asimismo, se

Gulf of California (Zeitzschel, 1969). For Bahía de los Ángeles, values have been reported of 1 to  $8 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  (Gilmartin and Revelante, 1978) and greater than  $50 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  (Canino-Herrera, 1989). Here, the mixing produced by the tide plays an important role in the coastal zone (Roden, 1959). Puerto Don Juan is located in Ballenas Channel, and is reported to have high turbulence and mixing (Roden, 1959). The mixing, associated with tides, transports the highly concentrated nutrients to the surface and increases the organic primary productivity. These processes are similar to those reported for upwelling zones along the Pacific coast of Baja California. This study was conducted to investigate whether the mixing produced in Ballenas Channel has an effect on nutrient availability and on increases in the organic primary productivity of the phytoplankton in this coastal lagoon during a period of spring and neap tides.

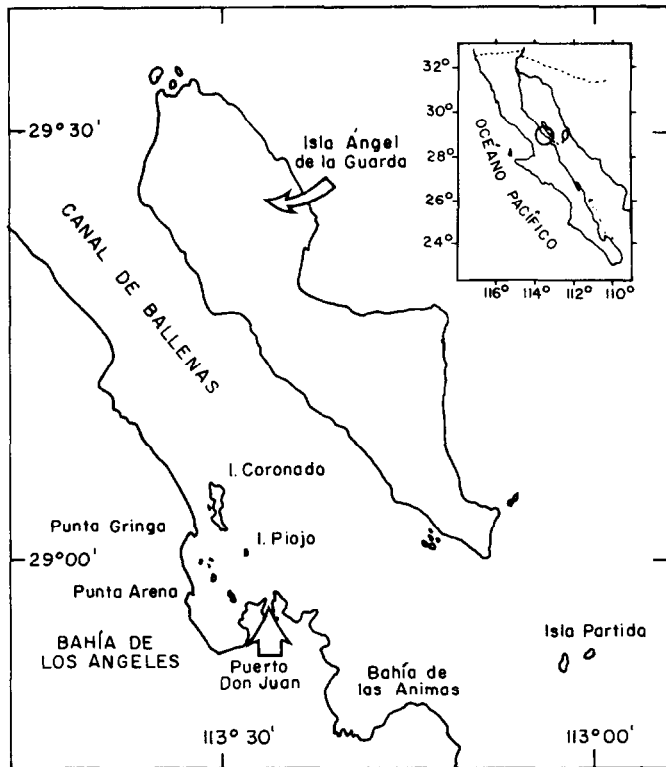
## STUDY AREA

Puerto Don Juan is located at the southern mouth of Ballenas Channel, east of Bahía de los Ángeles in the Gulf of California, between  $28^{\circ}56'15''$  and  $28^{\circ}57'05''\text{N}$  and  $113^{\circ}26'20''$  and  $113^{\circ}27'15''\text{W}$ . It is 2.3 km long, has an area of  $1.7 \text{ km}^2$  and a maximum depth of 15 m at the mouth of the lagoon during high tide (fig. 1).

## MATERIALS AND METHODS

A permanent station was used at the mouth of the coastal lagoon to generate time series at the surface and at a depth of 5 m. Van Dorn bottles (4-liter capacity) were used at two-hour intervals to measure the following variables from 6 to 12 August 1986: water temperature, salinity, nutrients (nitrates, phosphates and silicates) dissolved oxygen, photosynthetic pigments, pH and total alkalinity and irradiance during light hours. A discrete spatial sampling was conducted on the surface to measure chlorophyll *a* and its phaeophytin at 12 stations, covering the entire lagoon.

The ambient irradiance and photosynthetically active radiation (PAR) at the surface and



**Figura 1.** Localización del área de estudio: Puerto Don Juan, Canal de Ballenas, Golfo de California (México).

**Figure 1.** Location of the study area: Puerto Don Juan, Ballenas Channel, Gulf of California (Mexico).

realizó un muestreo espacial discreto de la concentración de clorofila *a* y su feofitina en superficie en 12 estaciones cubriendo toda la laguna.

La irradiancia ambiental y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) de superficie y de 5 m de profundidad fueron medidas *in situ*, empleando un fotómetro submarino Kahlsico 110WA200.

Las incubaciones de productividad del fitoplancton (POP), con el método de oxígeno, se efectuaron diariamente *in situ* de 08:00 a 12:00 y de 13:00 a 17:00 horas en superficie y a 5 m de profundidad, midiendo la PAR. La determinación de oxígeno disuelto de las botellas claras y oscuras se realizó en el campo, empleando la titulación fotométrica descrita

at 5 m depth were measured *in situ* with a Kahlsico 110WA200 submarine photometer.

The phytoplankton productivity (POP) incubations, using the oxygen method, were carried out daily *in situ* from 08:00 to 12:00 and from 13:00 to 17:00 hours at the surface and at 5 m depth, measuring the PAR. Dissolved oxygen in clear and dark bottles was determined in the field, using the photometric titration described by Bryan *et al.* (1976), modified by Cajal-Medrano *et al.* (1987). The POP estimated with the  $^{14}\text{C}$  method had an incubation period of two hours, from 08:00 to 10:00 and from 13:00 to 15:00 hours, adding  $1\ \mu\text{Ci}$  of radioactive bicarbonate ( $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ ), according to Strickland and Parsons (1972); the filters were exposed to vapors of concen-

por Bryan *et al.* (1976), modificada por Cajal-Medrano *et al.* (1987). La estimación de la POP con el método de  $^{14}\text{C}$  tuvo un periodo de incubación de dos horas, de 08:00 a 10:00 y de 13:00 a 15:00 horas, agregando  $1\ \mu\text{Ci}$  de bicarbonato radiactivo ( $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ ), según la técnica descrita en Strickland y Parsons (1972); los filtros fueron expuestos a vapores de HCl concentrado por 20 segundos y se colocaron en viales con 15 ml de líquido de centelleo. Para la determinación del carbono radiactivo se utilizó un contador de centelleo líquido Beckman LS100.

La temperatura superficial se registró con un termómetro de cubeta Kahlisco ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ). Para 5 m de profundidad, se empleó un termómetro reversible no protegido. Para salinidad, se emplearon botellas de citrato de magnesio de 350 ml de capacidad; su medición se efectuó en el laboratorio con un salinómetro conductímetro Beckman RS10. El oxígeno disuelto fue medido en el campo con la técnica descrita por Bryan *et al.* (1976), modificada por Cajal-Medrano *et al.* (1987), empleando botellas BOD de 300 ml. El pH y la alcalinidad total se determinaron en el campo con un potenciómetro Photovolt 126A, según lo descrito en Strickland y Parsons (1972).

Para determinar la concentración de nitratos, fosfatos y silicatos disueltos, se recolectó agua de mar sin filtrar; se preservó con hielo seco y se analizó posteriormente, de acuerdo con las técnicas espectrofotométricas descritas en Strickland y Parsons (1972).

Los pigmentos fotosintéticos se determinaron filtrando 500 ml de agua de mar y adicionando 1 ml de solución saturada de  $\text{MgCO}_3$  (Richards y Thompson, 1952). Los filtros se congelaron con hielo seco y en el laboratorio se analizaron con la técnica descrita en Strickland y Parsons (1972). La concentración se calculó con las ecuaciones descritas por Millán-Núñez y Álvarez-Borrego (1978).

El cociente fotosintético (PQ) (Williams *et al.*, 1979) se determinó como factor para convertir datos de la evolución del oxígeno a consumo de bióxido de carbono ( $\Delta\text{O}_2/-\Delta\text{CO}_2$ ). Este parámetro se obtuvo con mediciones simultáneas en producción de oxígeno (técnica de

trated HCl for 20 seconds and were placed in vials containing 15 ml of scintillation liquid. A Beckman LS100 liquid scintillation counter was used to determine the radioactive carbon.

Surface temperature was recorded with a Kahlisco bucket thermometer ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ). An unprotected reversing thermometer was used at the 5 m depth. Salinity was measured using 350-ml magnesium citrate bottles in the laboratory with a Beckman RS10 salinometer conductimeter. Dissolved oxygen was measured in the field with the technique described by Bryan *et al.* (1976), modified by Cajal-Medrano *et al.* (1987), using 300-ml BOD bottles. Total alkalinity and pH were determined in the field, using a Photovolt 126A pHmeter, as described by Strickland and Parsons (1972).

In order to determine the concentration of dissolved nitrates, phosphates and silicates, unfiltered sea water was collected and preserved with dry ice. It was later analyzed according to the spectrophotometric techniques described by Strickland and Parsons (1972).

The photosynthetic pigments were determined by filtering 500 ml of sea water and adding 1 ml of a saturated solution of  $\text{MgCO}_3$  (Richards and Thompson, 1952). The filters were placed on dry ice and analyzed in the laboratory with the technique described by Strickland and Parsons (1972). The concentration was calculated using the equations described by Millán-Núñez and Álvarez-Borrego (1978).

To convert the data on oxygen evolution to carbon dioxide consumption ( $\Delta\text{O}_2/-\Delta\text{CO}_2$ ), the photosynthetic quotient (PQ) was used (Williams *et al.*, 1979). This parameter was obtained from simultaneous measurements of oxygen production (clear and dark bottle technique) (Strickland, 1960) and from inorganic carbon fixation (radioactive carbon technique,  $^{14}\text{C}$ ) (Stemann-Nielsen, 1952).

## RESULTS

Air temperature varied from  $28^\circ\text{C}$  during the night to  $38^\circ\text{C}$  during the day. Ambient irradiance presented maximum values of

botellas claras y oscuras) (Strickland, 1960) y fijación de carbono inorgánico (técnica con carbono radiactivo,  $^{14}\text{C}$ ) (Stemann-Nielsen, 1952).

## RESULTADOS

La temperatura del aire varió desde 28°C por las noches hasta 38°C en el día. La irradiación ambiental presentó valores máximos de 386  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  a las 12:00 horas y de 250  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  a las 16:00 horas.

La fluctuación de la PAR en superficie para las incubaciones de las 10:00 horas fue de 109 a 134  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , para las 13:00 de 151 a 168  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  y para las 17:00 de 26 a 63  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

La marea (fig. 2a) osciló de -0.2 a 2.3 m, referido al nivel de bajamar media inferior.

La temperatura del agua fluctuó entre 26 y 30°C en superficie y entre 26 y 29°C a 5 m de profundidad (tabla 1). La serie de tiempo de temperatura superficial denotó cambios regulares durante los dos primeros días de estudio, mientras que en los siguientes días las fluctuaciones fueron irregulares y muy notorias, con tendencia a disminuir durante mareas muertas (fig. 2b). La temperatura a 5 m de profundidad mostró temperaturas bajas y estables, con tendencia a disminuir en mareas muertas (fig. 2b); durante los primeros dos días (mareas vivas) hubo diferencias entre superficie y 5 m, existiendo para el resto del muestreo una pequeña diferencia para las dos profundidades.

La fluctuación de salinidad durante la serie fue de 35.54 a 35.63‰ (tabla 1). El pH varió de 8.08 a 8.32 en superficie y de 7.85 a 8.22 a 5 m de profundidad (tabla 1). La alcalinidad específica de la serie de tiempo en superficie fue de 0.119, con una desviación estándar de  $\pm 0.008$ .

El oxígeno disuelto presentó un promedio de 4.0  $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$  y una desviación estándar de  $\pm 1.7 \text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$ . El máximo observado fue de 8.6  $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$  y el mínimo de 1.53  $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$  (tabla 1). Las series de tiempo para oxígeno de superficie y 5 m de profundidad denotaron variabilidad muy marcada, con una tendencia a incrementar su concentración al final del estudio (fig. 2c).

Los nitratos superficiales en toda la serie presentaron una concentración promedio de 3.7  $\mu\text{M}$ , con una desviación estándar de  $\pm 0.7 \mu\text{M}$  y un promedio de  $4.4 \pm 1.2 \mu\text{M}$  para 5 m de profundidad. La serie presentó un

386  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  at 12:00 hours and 250  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  at 16:00 hours.

The PAR fluctuations in the surface incubations were from 109 to 134  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  at 10:00, from 151 to 168  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  at 13:00 and from 26 to 63  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  at 17:00 hours.

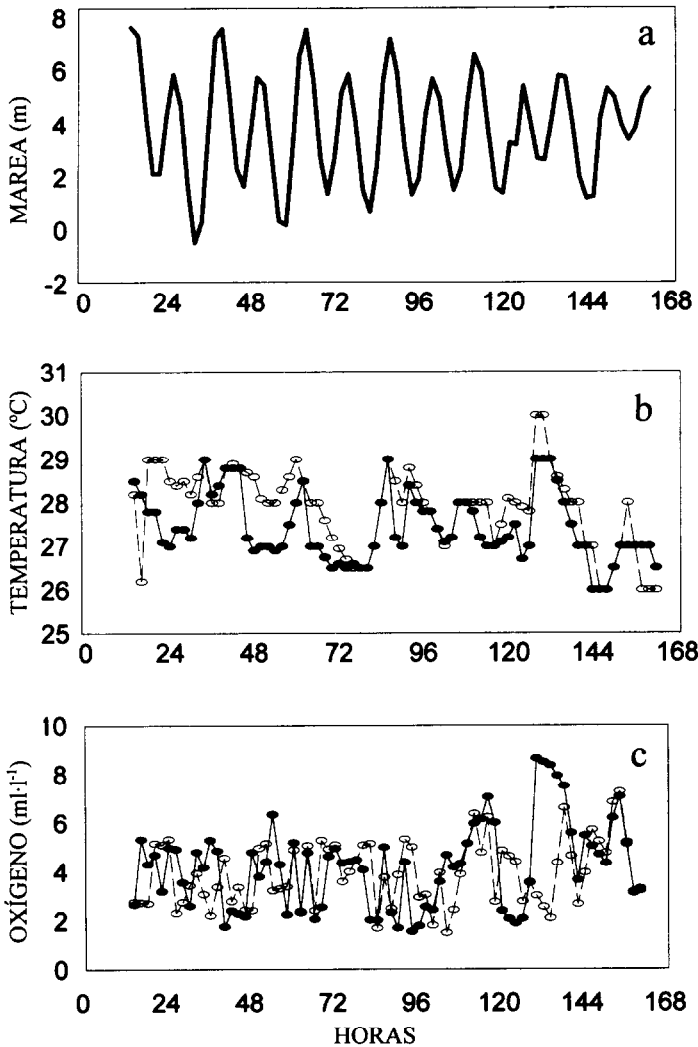
The tide (fig. 2a) varied from -0.2 to 2.3 m, with reference to the mean low water.

Water temperature varied from 26 to 30°C at the surface, and from 26 to 29°C at 5 m depth (table 1). The time series of surface temperature showed regular changes during the first two days of the study, whereas the fluctuations became irregular and very conspicuous in the following days, with a tendency to decrease at neap tides (fig. 2b). The temperature at 5 m depth was low and stable, tending to decrease at neap tides (fig. 2b). There were differences in temperature at the surface and 5 m depth during the first two days (spring tides); there was a small difference for both depths during the rest of the sampling.

Salinity during the series fluctuated between 35.54 and 35.63‰ (table 1). The pH varied from 8.08 to 8.32 at the surface and from 7.85 to 8.22 at 5 m depth (table 1). The specific alkalinity from the time series was 0.119 at the surface, with a standard deviation of  $\pm 0.008$ .

The dissolved oxygen averaged 4.0  $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$ , with a standard deviation of  $\pm 1.7 \text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$ . The maximum observed was 8.6  $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$  and the minimum was 1.53  $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$  (table 1). The time series for oxygen at the surface and at 5 m depth showed marked variability, with a tendency to increase its concentration at the end of the study (fig. 2c).

Throughout the series, the surface nitrates presented an average concentration of 3.7  $\mu\text{M}$ , with a standard deviation of  $\pm 0.7 \mu\text{M}$  and an average of  $4.4 \pm 1.2 \mu\text{M}$  at 5 m depth. The series presented a maximum and minimum of 5.8 and 2.6  $\mu\text{M}$  at the surface, and 9.0 and 2.0  $\mu\text{M}$  at 5 m depth, respectively (table 1). Notable changes were observed at 10-h intervals in the surface time series. The time series for the nitrates at 5 m depth showed slightly pronounced alterations in the first two days during spring tides, with values close to the average; significant changes in concentration were detected during the following days (fig. 3a).



**Figura 2.** Variabilidad de: (a) marea sobre el nivel de bajamar media inferior, (b) temperatura y (c) oxígeno disuelto. Los círculos vacíos son registros de superficie y los círculos llenos de 5 m de profundidad; los números en el eje x significan medianoche.

**Figure 2.** Variability of: (a) tide at the mean low water, (b) temperature and (c) dissolved oxygen. The empty circles are records for the surface and the filled-in circles for 5 m depth; the numbers on the x axis represent midnight.

máximo y mínimo de 5.8 y 2.6  $\mu\text{M}$  en superficie y de 9.0 y 2.0  $\mu\text{M}$  a 5 m, respectivamente (tabla 1). En la serie de tiempo, para superficie se observaron cambios notorios en intervalos del orden de decenas de horas. La serie de tiempo para nitratos a 5 m de profundidad mostró

The surface phosphates presented a maximum of 1.1  $\mu\text{M}$  and a minimum of 0.2  $\mu\text{M}$ ; at 5 m depth, the maximum and minimum were 2.6 and 0.2  $\mu\text{M}$ , respectively. The averages were  $0.8 \pm 0.1 \mu\text{M}$  at the surface and  $0.9 \pm 0.3 \mu\text{M}$  at 5 m (table 1). The phosphates at

**Tabla 1.** Descriptores estadísticos de la hidrología superficial y a 5 m de profundidad.  
**Table 1.** Statistical descriptions of the hydrology at the surface and at 5 m depth.

	Temperatura (°C)	Salinidad (‰)	pH	Oxígeno (ml·l <sup>-1</sup> )	Nitratos (µM)	Fosfatos (µM)	Silicatos (µM)
<b>Superficie</b>							
Promedio	27.8	35.621	8.24	3.91	3.69	0.76	14.16
Desviación estándar	0.9	0.010	0.08	1.37	0.67	0.14	6.49
Máximo	30.0	35.632	8.32	7.27	5.78	1.05	39.50
Mínimo	26.0	35.563	8.08	0.42	2.58	0.15	3.23
<b>5 m</b>							
Promedio	27.4	35.570	8.11	4.26	4.45	0.93	16.29
Desviación estándar	0.8	0.020	0.15	1.75	1.24	0.29	6.25
Máximo	29.0	35.612	8.22	8.66	8.98	2.62	31.85
Mínimo	26.0	35.540	7.85	1.58	1.95	0.15	6.17

alteraciones poco pronunciadas durante los dos primeros días en mareas vivas, con valores cercanos al promedio; para los siguientes días se lograron detectar cambios significativos en su concentración (fig. 3a).

Los fosfatos en superficie presentaron un máximo de 1.1 µM y un mínimo de 0.2 µM; para 5 m de profundidad, el máximo y mínimo fueron 2.6 y 0.2 µM, respectivamente. Los promedios fueron de 0.8 ± 0.1 µM para la superficie y de 0.9 ± 0.3 µM para 5 m (tabla 1). Los fosfatos a 5 m de profundidad presentaron, durante casi todo el estudio, fluctuaciones inferiores a 0.3 µM (fig. 3b).

Los resultados de silicatos denotan valores promedio de 14.2 ± 6.5 µM y 16.3 ± 6.3 µM para superficie y 5 m de profundidad, respectivamente. Los valores máximos registrados para la misma secuencia de profundidades fueron 39.5 y 31.9 µM, los mínimos que se presentaron fueron 3.2 y 6.2 µM (tabla 1). Las series de tiempo para superficie y 5 m tienen cambios significativos durante todo el periodo de estudio (fig. 3c).

La concentración de clorofila *a* (C<sub>la</sub>) fue, en general, más alta a 5 m de profundidad que en superficie. Los valores máximos y mínimos de C<sub>la</sub> en superficie fueron 5.3 y 0.6 mg·m<sup>-3</sup>, respectivamente. Para feofitina *a*, a 5 m de profundidad el valor máximo fue 5.1 mg·m<sup>-3</sup> y

5 m presented fluctuations lower than 0.3 µM throughout almost the entire study (fig. 3b).

The results of the silicates showed average values of 14.2 ± 6.5 µM and 16.3 ± 6.3 µM at the surface and 5 m depth, respectively. The maximum values recorded for the same depth sequence were 39.5 and 31.0 µM; the minimum values were 3.2 and 6.2 µM (table 1). Both the surface and 5-m time series show significant changes throughout the entire study (fig. 3c).

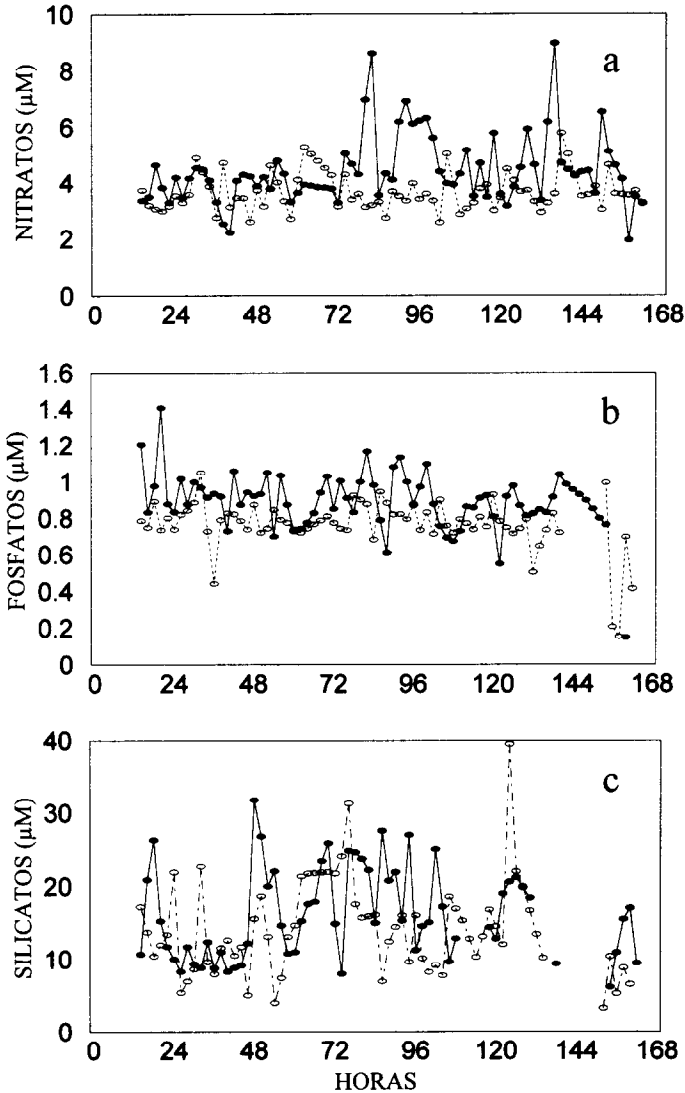
The concentration of chlorophyll *a* (Ch<sub>la</sub>) was generally greater at 5 m depth than at the surface. The maximum and minimum values of Ch<sub>la</sub> at the surface were 5.3 and 0.6 mg·m<sup>-3</sup>, respectively. For phaeophytin *a*, the maximum value at 5 m depth was 5.1 mg·m<sup>-3</sup> and the minimum was 0.1 mg·m<sup>-3</sup>; the pigmentary tendency increases at neap tides (table 2).

During the time series, the variability of Ch<sub>la</sub> at both depths tends to increase at neap tides (fig. 4a), whereas the concentration of phaeophytin *a* was generally inverse to that of Ch<sub>la</sub> (fig. 4b).

The spatial distribution of Ch<sub>la</sub> at the surface averaged 3.2 mg·m<sup>-3</sup>, with a tendency to increase its concentration towards the center of the lagoon along the west margin.

The POP values using the dissolved oxygen method were high (table 2), especially in the incubations at 5 m depth, with a maxi-





**Figura 3.** Variabilidad de nutrientes: (a) nitratos, (b) fosfatos y (c) silicatos. Los círculos vacíos son registros de superficie y los círculos llenos de 5 m de profundidad; los números en el eje x significan medianoche.

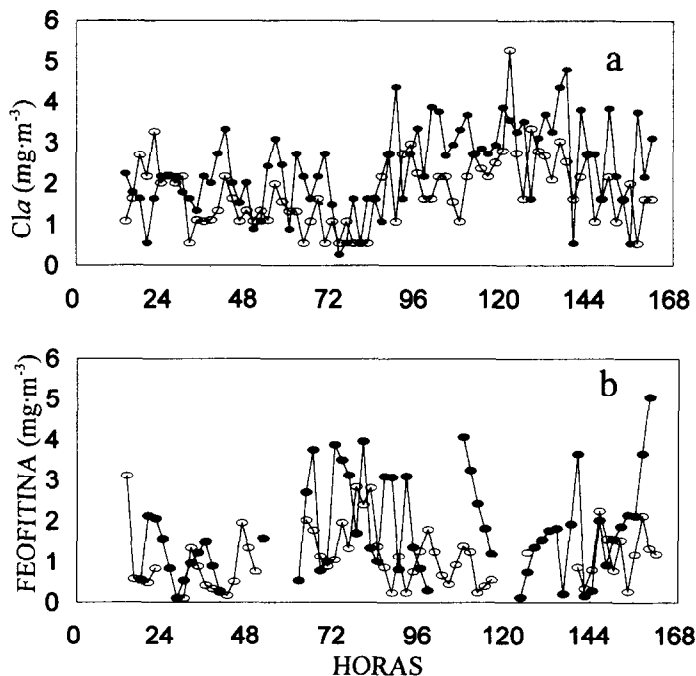
**Figure 3.** Nutrient variability: (a) nitrates, (b) phosphates and (c) silicates. The empty circles are records for the surface and the filled-in circles for 5 m depth; the numbers on the x axis represent midnight.

el mínimo  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; la tendencia pigmentaria es de incrementarse durante mareas muertas (tabla 2).

La variabilidad de la  $\text{Chl}$  durante la serie de tiempo, en ambos niveles de profundidad, tiene una tendencia a aumentar en mareas muertas

num gross photosynthesis of  $126 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  (fig. 5a). There were slight fluctuations in the respiration values, with a maximum of  $60 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ .

With the  $^{14}\text{C}$  method, POP varied from 15.45 to  $87.92 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  (fig. 5a), with an



**Figura 4.** Variabilidad pigmentaria: (a) clorofila *a* y (b) feofitina *a*. Los círculos vacíos son registros de superficie y los círculos llenos de 5 m de profundidad; los números en el eje *x* significan medianoche.

**Figure 4.** Pigmentary variability: (a) chlorophyll *a* and (b) phaeophytin *a*. The empty circles are records for the surface and the filled-in circles for 5 m depth; the numbers on the *x* axis represent midnight.

(fig. 4a), mientras que la concentración de feofitina *a* presentó, en general, una tendencia inversa a la de Cla (fig. 4b).

La distribución espacial de Cla en superficie presentó un promedio de  $3.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , con tendencia de incrementar su concentración hacia el interior de la laguna sobre su margen oeste.

Los resultados de POP utilizando el método de oxígeno disuelto mostraron valores altos (tabla 2), especialmente en las incubaciones efectuadas a 5 m de profundidad, con máximos de fotosíntesis bruta de  $126 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  (fig. 5a). Los valores de respiración presentaron fluctuaciones ligeras, con un máximo de  $60 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ .

La POP usando el método de  $^{14}\text{C}$  presentó una variabilidad de 15.45 a  $87.92 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  (fig. 5a), con un promedio de  $36.6 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$

average at the surface of  $36.6 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  and at 5 m of  $38.6 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ . As observed with Chl*a* in the time series, this also tends to increase during neap tides (fig. 4a).

The PQ used was 2.0 for 9 August, 2.3 for 11 August at the surface and 2.9 at 5 m depth.

The assimilation ratio ( $P^B$ ) was from 8.7 to  $23.9 \text{ mgC}\cdot\text{mgChl}a^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  with radioactive carbon and from 1.6 to  $35.6 \text{ mgC}\cdot\text{mgChl}a^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  with the oxygen method, presenting greater values at 5 m (table 2; fig. 5b).

## DISCUSSION

It has been reported for the study area that the tidal current is the principal cause of variability in the system (Roden and Groves, 1959; Álvarez-Borrego, 1983; Badan-Dangon *et al.*, 1985), whereas other authors claim the wind as

**Tabla 2.** Descriptores estadísticos de la concentración pigmentaria y de la productividad orgánica primaria (POP) del fitoplancton en superficie y a 5 m de profundidad (DE = desviación estándar).  
**Table 2.** Statistical descriptions of the pigmentary concentration and of phytoplankton organic primary productivity (POP) at the surface and at 5 m depth (DE = standard deviation).

	Clorofila <i>a</i> (mg·m <sup>-3</sup> )	Feofitina (mg·m <sup>-3</sup> )	POP ( <sup>14</sup> C) (mgC·m <sup>-3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	POP (O <sub>2</sub> ) (mgC·m <sup>-3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	P <sup>B</sup> ( <sup>14</sup> C) (mgC·mgCl <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	P <sup>B</sup> (O <sub>2</sub> ) (mgC·mgCl <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )
<b>Superficie</b>						
Promedio	1.8	1.1	35.01	14.51	17.01	14.89
DE	0.8	0.7	14.71	14.81	5.96	16.94
Máximo	5.3	2.8	65.14	32.57	23.68	35.62
Mínimo	0.6	0.1	15.45	3.71	8.73	1.60
<b>5 m</b>						
Promedio	2.4	1.8	36.94	58.00	13.82	13.15
DE	1.0	1.2	19.24	45.56	5.09	5.26
Máximo	4.8	5.1	87.92	111.79	23.76	13.43
Mínimo	0.3	0.1	22.43	33.21	10.10	12.86

para superficie y de 38.6 mgC·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup> para 5 m y una tendencia a incrementarse en mareas muertas, correspondiendo a la misma tendencia para Cl<sub>a</sub> en la serie de tiempo (fig. 4a).

El PQ que se utilizó fue 2.0 para el 9 de agosto, 2.3 para el 11 de agosto en superficie y 2.9 a 5 m de profundidad.

La razón de asimilación (P<sup>B</sup>) fue de 8.7 a 23.9 mgC·mgCl<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> con carbono radiactivo y de 1.6 a 35.6 mgC·mgCl<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> con el método de oxígeno, que presentó valores mayores a 5 m de profundidad (tabla 2; fig. 5b).

## DISCUSIÓN

Se ha reportado, para la zona de estudio, que la corriente de marea es la principal causa de la variabilidad del sistema (Roden y Groves, 1959; Álvarez-Borrego, 1983; Badan-Dangon *et al.*, 1985), mientras que otros autores señalan al viento como el principal responsable (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1985). Durante este estudio se eliminó esta última posibilidad debido a la escasa e irregular presencia del viento.

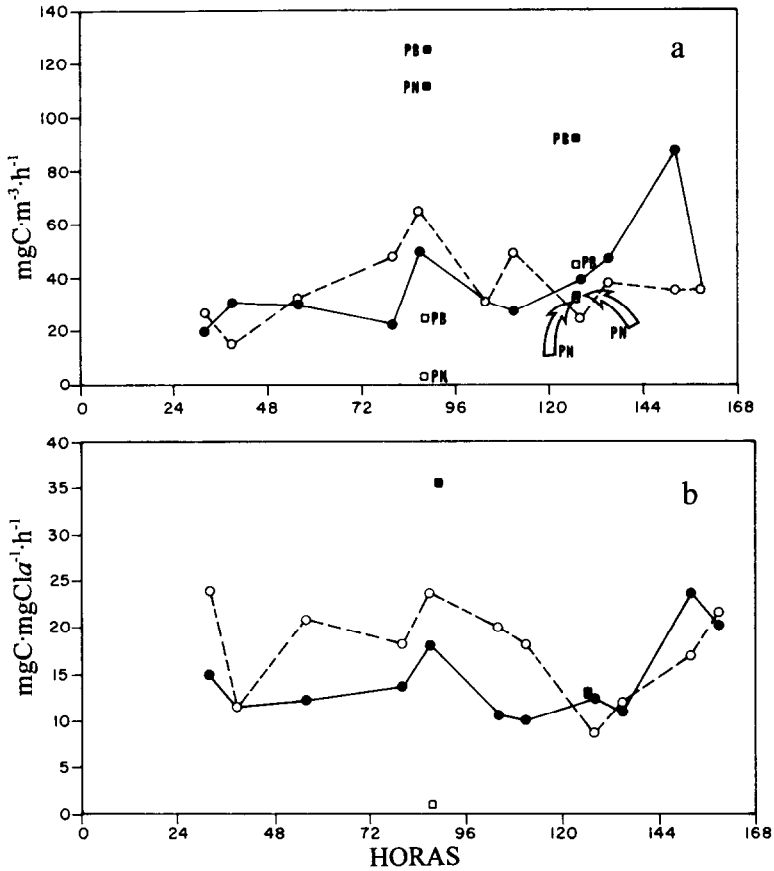
El pH mostró variabilidad, con un promedio de 8.24 ± 0.08 y de 8.11 ± 0.15 para superficie y 5 m de profundidad, respectivamente, debido a las fluctuaciones en la productividad orgánica primaria, que a su vez incrementaron los valores

the principal cause (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1985). The latter possibility was eliminated during this study, due to the scarcity and irregularity of the wind.

Variability was found between the pH at the surface and at 5 m depth, with averages of 8.24 ± 0.08 and 8.11 ± 0.15, respectively, due to fluctuations in organic primary productivity that increased the values of dissolved oxygen during neap tides. The values reported for Ballenas Channel between April and May are 8.0 and 8.1 (Gaxiola-Castro *et al.*, 1985), with surface values during winter from 8.22 to 8.4 for the Gulf of California (Zirino and Lieberman, 1985). Total alkalinity varied greatly (2.34 and 2.62 mEq/l at the surface and at 5 m, respectively). However, the average specific alkalinity at the surface throughout the entire series (0.119) was the same as that previously reported (Gaxiola-Castro *et al.*, 1978; Zirino and Lieberman, 1985).

The high temperatures of the sea water during the sampling period decreased oxygen solubility in the water (fig. 6), and slightly increased salinity via evaporation (table 1).

During winter conditions at Bahía de los Ángeles, surface oxygen values of 8.0 ml·l<sup>-1</sup> and oxygen saturation percentages close to 100% have been reported during spring

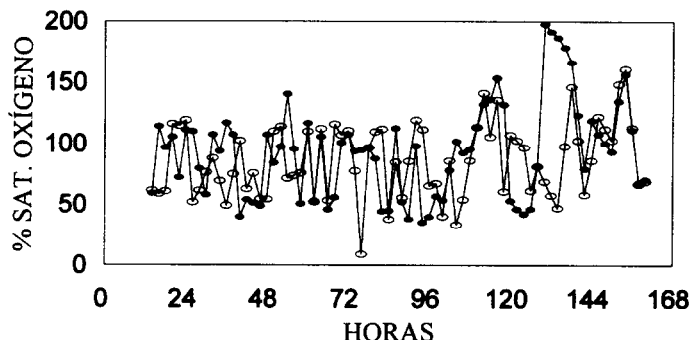


**Figura 5.** Variabilidad de: (a) productividad orgánica primaria y (b) razón de asimilación. Los resultados que se calcularon con incubaciones de  $^{14}\text{C}$  se presentan con círculos vacíos para superficie y círculos llenos para 5 m de profundidad. Los cuadros vacíos son los resultados que proceden de las incubaciones para observar diferencias en el contenido de oxígeno en superficie y los cuadros llenos son para 5 m de profundidad. PB = productividad bruta y PN = productividad neta. Los números en el eje x significan medianoche.

**Figure 5.** Variability of: (a) organic primary productivity and (b) assimilation ratio. The empty circles represent the results from the  $^{14}\text{C}$  incubations at the surface and the filled-in circles at 5 m depth. The empty squares represent the results of the incubations conducted for observing differences in the oxygen content at the surface and the filled-in squares at 5 m depth. PB = gross productivity and PN = net productivity. The numbers on the x axis represent midnight.

de oxígeno disuelto durante mareas muertas. Los valores reportados para el Canal de Ballenas entre abril y mayo son de 8.0 y 8.1 (Gaxiola-Castro *et al.*, 1978), con valores superficiales de 8.22 a 8.48 para el Golfo de California en invierno (Zirino y Lieberman, 1985). La alcalinidad total presentó gran

tides, increasing to 140% during neap tides (López-Valdez, 1989). During this study at Puerto Don Juan (fig. 6), the surface maximum was  $7.27 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$  and the percentage of oxygen saturation varied from 33 to 146%. The variability of the oxygen increased during neap tides, with a maximum oxygen supersaturation



**Figura 6.** Porcentaje de saturación de oxígeno. Los círculos vacíos son datos de superficie y los círculos llenos de 5 m de profundidad; los números en el eje x significan medianoche.

**Figure 6.** Percentage of saturated oxygen. The empty circles are surface data and the filled-in circles 5 m depth data; the numbers on the x axis represent midnight.

variabilidad (2.34 y 2.62 mEq/l para superficie y 5 m, respectivamente). Sin embargo, la alcalinidad específica promedio en superficie para toda la serie (0.119) fue igual a la reportada anteriormente (Gaxiola-Castro *et al.*, 1978; Zirino y Lieberman, 1985).

Las elevadas temperaturas del agua de mar durante el periodo de muestreo disminuyeron la solubilidad del oxígeno en el agua (fig. 6) e incrementaron ligeramente la salinidad por evaporación (tabla 1).

Para Bahía de los Ángeles, en condiciones de invierno, se han reportado valores superficiales de 8.0 ml·l<sup>-1</sup> de oxígeno y porcentajes de saturación de oxígeno cercanos a 100% en mareas vivas, aumentando hasta 140% en mareas muertas (López-Valdez, 1989). En Puerto Don Juan, en este estudio (fig. 6), el máximo superficial fue 7.27 ml·l<sup>-1</sup> y el porcentaje de saturación de oxígeno fluctuó de 33 a 146%. La variabilidad del oxígeno se incrementó en mareas muertas, teniendo una máxima sobresaturación de oxígeno en ambas profundidades, debido quizá al incremento de la fotosíntesis por el acondicionamiento del fitoplancton y macroalgas. Ibarra-Sañudo (1988) reportó algo similar para verano de 1986 en la parte norte de Bahía de los Ángeles, con valores de sobresaturación durante toda la serie de tiempo. Sin embargo, en este estudio se encontró que el 71% de los datos son de insaturación, lo que

at both depths, possibly due to the increase in photosynthesis from the conditioning of the phytoplankton and macroalgae. Ibarra-Sañudo (1988) reported similar findings for the summer of 1986 in northern Bahía de los Ángeles, with supersaturation values during the entire time series. In this study, however, we found that 71% of the data are of unsaturation, indicating that the oxidation of organic matter (principally) and of inorganic matter consumes oxygen, leading to low levels of concentration. Oxygen consumption reflects aerobic respiration, with the consequent production of carbon dioxide.

In this study, the dissolved oxygen at 5 m depth was greater than that at the surface (fig. 2c), due to the difference in temperature that regulates gas solubility and the photosynthetic process (fig. 5a).

The maximum nitrate values for Ballenas Channel are greater than 13 μM (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978), and are almost twice as much as those reported for the surface at Puerto Don Juan. Variability of the nitrates during the summer at San Quintín Bay was from 0.1 to 12.5 μM (Millán-Núñez *et al.*, 1982) and from 0.5 to 5 μM (Silva-Cota and Álvarez-Borrego, 1988) during upwelling and El Niño conditions, respectively. Puerto Don Juan presented less variability at the surface compared to an upwelling at San Quintín Bay, but was similar to that reported during the El Niño phenome-

indica que la oxidación de materia orgánica (principalmente) y de material inorgánico consume el oxígeno, llevándolo a niveles bajos de concentración. El consumo de oxígeno refleja la respiración aeróbica, con la consecuente producción de bióxido de carbono.

El oxígeno disuelto en este estudio a 5 m de profundidad fue mayor que en superficie (fig. 2c), debido a la diferencia en temperatura que regula la solubilidad del gas y al proceso fotosintético (fig. 5a).

Los máximos de nitratos para el Canal de Ballenas son superiores a los 13  $\mu\text{M}$  (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978), siendo éstos casi el doble que los máximos reportados para Puerto Don Juan en superficie. La variabilidad de los nitratos en verano para Bahía San Quintín fue de 0.1 a 12.5  $\mu\text{M}$  (Millán-Núñez *et al.*, 1982) y de 0.5 a 5  $\mu\text{M}$  (Silva-Cota y Álvarez-Borrego, 1988) en condiciones de surgencia y El Niño, respectivamente. Puerto Don Juan presentó una menor variabilidad en superficie comparada con una surgencia en Bahía San Quintín, pero similar a la reportada durante el fenómeno de El Niño; sin embargo, a 5 m de profundidad, la variabilidad fue mayor en Puerto Don Juan.

La concentración de fosfatos es comparable a la de Bahía San Quintín, con un máximo cercano a 3.0  $\mu\text{M}$  durante un evento de surgencia (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982).

La variabilidad de la concentración de silicatos (fig. 3c) se atribuye a la gran abundancia de diatomeas (Santamaría-del Ángel, 1988). Los valores de silicatos son similares a los reportados por Álvarez-Borrego *et al.* (1978) para el Canal de Ballenas (29  $\mu\text{M}$ ); sin embargo, los máximos registrados en este estudio exceden los 39  $\mu\text{M}$  en superficie y 31  $\mu\text{M}$  a 5 m de profundidad.

Con base en las concentraciones mínimas de nutrientes requeridas para la fotosíntesis, sugeridas por diversos autores (Dugdale, 1967; Eppley *et al.*, 1969; Caperon y Meyer, 1972; Droop, 1973; Fineko y Krupatkina-Akinina, 1974; Paasche, 1975; Conway, 1977), las concentraciones encontradas durante este estudio no son limitantes para la fotosíntesis.

Las abundancias mayores de fitoplancton en el Golfo de California se han detectado

non; however, at 5 m depth, the variability at Puerto Don Juan was greater.

The concentration of phosphates is comparable to that of San Quintín Bay, with a maximum close to 3.0  $\mu\text{M}$  during an upwelling event (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982).

Variability of the concentration of silicates (fig. 3c) is attributed to the great abundance of diatoms (Santamaría-del Ángel, 1988). The silicate values are similar to those reported by Álvarez-Borrego *et al.* (1978) for Ballenas Channel (29  $\mu\text{M}$ ); however, the maximum values reported in this study exceed 39  $\mu\text{M}$  at the surface and 31  $\mu\text{M}$  at 5 m depth.

Based on the minimum nutrient concentrations required for photosynthesis, as proposed by various authors (Dugdale, 1967; Eppley *et al.*, 1969; Caperon and Meyer, 1972; Droop, 1973; Fineko and Krupatkina-Akinina, 1974; Paasche, 1975; Conway, 1977), the concentrations found during this study do not limit photosynthesis.

The greatest abundance of phytoplankton in the Gulf of California has been detected in the Guaymas Basin,  $3 \times 10^6$  cells·l<sup>-1</sup> (Álvarez-Borrego and Lara-Lara, 1991). In a simultaneous study at Puerto Don Juan, the phytoplankton abundance was greater than  $3.5 \times 10^6$  cells·l<sup>-1</sup> (Santamaría-del Ángel, 1988). The counting technique may be responsible for the differences observed between both these studies in the central part of the Gulf of California.

The nanoplankton (cells <20  $\mu\text{m}$ ) generally contribute a greater biomass of Chla than the microplankton (cells >20  $\mu\text{m}$ ) in the central region of the Gulf of California (Valdez-Holguín and Lara-Lara, 1987). In the summer of 1986 at Puerto Don Juan, Santamaría-del Ángel (1988) found high values of ultraplankton, nanoplankton and microplankton. These organisms, dominated by the genus *Chaetoceros*, are responsible for the nutrient consumption and productivity reported in this study. The maximum abundance of phytoplankton coincides with low concentrations of nutrients (fig. 3a, b, c).

The concentrations of Chla and phaeophytin showed increasing tendencies during neap tides, due to the conditioning of the

en la Cuenca de Guaymas,  $3 \times 10^6$  células·l<sup>-1</sup> (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). Para Puerto Don Juan, en un estudio simultáneo al presente, se encontraron abundancias de fitoplancton superiores a  $3.5 \times 10^6$  células·l<sup>-1</sup> (Santamaría-del Ángel, 1988). La técnica de conteo puede ser la responsable de las diferencias observadas entre ambos estudios en la parte central del Golfo de California.

Por lo general el nanoplancton (células <20 µm) contribuye con mayor biomasa de *Cla* que el microplancton (células >20 µm) para la región central del Golfo de California (Valdez-Holguín y Lara-Lara, 1987). Para Puerto Don Juan, en verano de 1986, Santamaría-del Ángel (1988) reportó valores altos de ultraplancton, nanoplancton y microplancton, siendo éstos los organismos responsables del consumo de nutrientes y de la productividad reportada en este estudio, con una predominancia de organismos del género *Chaetoceros*. La abundancia máxima del fitoplancton coincide con concentraciones bajas de nutrientes (fig. 3a, b, c).

La *Cla* y la feofitina *a* mostraron una tendencia a incrementar su concentración durante marea muerta debido al acondicionamiento del fitoplancton. Los valores de *Cla* en este estudio (tabla 2) fueron similares y su promedio ligeramente mayor que los reportados para Bahía de los Ángeles en verano (Canino-Herrera, 1989) y para Bahía Todos Santos (Gaxiola-Castro y Álvarez-Borrego, 1984), y menores que los reportados para Bahía San Quintín (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982; Gaxiola-Castro y Álvarez-Borrego, 1984).

La relación clorofila-nitratos en superficie no fue tan clara como la de marea-nitratos, pero se detectó que en mareas vivas una alta concentración de nitratos está asociada a una baja concentración de *Cla*. Durante mareas muertas, no se observó un patrón definido (figs. 3a, 4a). La biomasa fitoplanctónica en mareas vivas no presentó grandes alteraciones (Santamaría-del Ángel, 1988), en tanto que los nitratos variaron grandemente con la marea viva. En cambio, para la marea muerta, la concentración de *Cla* varió en un orden de magnitud (de  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  hasta valores superiores a  $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) debido al acondicionamiento a la luz y nutrientes durante el periodo de poca turbulencia.

phytoplankton. The *Chla* values in this study (table 2) were similar and the average slightly greater than those reported during the summer at Bahía de los Ángeles (Canino-Herrera, 1989) and at Todos Santos Bay (Gaxiola-Castro and Álvarez-Borrego, 1984) and lower than at San Quintín Bay (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982; Gaxiola-Castro and Álvarez-Borrego, 1984).

The chlorophyll-nitrate relation at the surface was not as clear as that of tide-nitrates. However, a high concentration of nitrates associated with a low concentration of *Chla* was detected during spring tides. No definite pattern was observed during neap tides (figs. 3a, 4a). The phytoplankton biomass during spring tides did not present significant alterations (Santamaría-del Ángel, 1988), whereas the nitrates varied greatly with the spring tide. In contrast, the concentration of *Chla* during neap tides varied in magnitude (from  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  to values greater than  $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), due to the conditioning of light and nutrients during the period of little turbulence.

The POP measured at the surface with the <sup>14</sup>C method was generally less than that determined with the oxygen method. This is reflected at the 5 m depth where the POP estimated with the dissolved oxygen method was, on average, 1.5 times greater than that estimated using <sup>14</sup>C. For the area of Bahía de los Ángeles, Canino-Herrera (1989) found that the productivity estimated with the oxygen method is approximately three times that calculated with radioactive carbon. For other productive areas in the Pacific with upwelling conditions, such as San Quintín Bay, an average of  $44 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  was found in summer using the <sup>14</sup>C method, ranging from 1.6 to  $91.4 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  (Lara-Lara *et al.*, 1980). Millán-Núñez *et al.* (1982) reported average values for the mouth, middle and two extremes of 33, 12, 12 and  $16 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ , respectively, which are slightly greater than those reported for Bahía de los Ángeles (Gilmartin and Revelante, 1978; Canino-Herrera, 1989).

The POP results from both methods were closely related, since this difference was minimized by using an appropriate PQ value for each experiment (Williams *et al.*, 1979; Raine,

La POP que se midió en superficie con el método de  $^{14}\text{C}$  fue generalmente menor que los determinados con el método de oxígeno, reflejándose a 5 m de profundidad donde la POP estimada con el método de oxígeno disuelto fue 1.5 veces mayor, en promedio, que la estimada con el uso de  $^{14}\text{C}$ . Canino-Herrera (1989), en el área de Bahía de los Ángeles, encontró que la productividad estimada con el método de oxígeno es aproximadamente tres veces la calculada con carbono radiactivo. Para otras áreas productivas con surgencias en el Pacífico, como Bahía San Quintín, se reportó, utilizando el método de  $^{14}\text{C}$  en verano, un promedio de  $44 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ , con un intervalo de 1.6 a  $91.4 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  (Lara-Lara *et al.*, 1980). Millán-Núñez *et al.* (1982) reportaron valores promedios en cuatro estaciones, la boca, intermedia y a los dos extremos, de 33, 12, 12 y  $16 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ , respectivamente, y ligeramente mayores que los reportados para Bahía de los Ángeles (Gilmartin y Revelante, 1978; Canino-Herrera, 1989).

Los resultados de POP por ambos métodos muestran valores cercanos entre sí, dado que se minimizó esta diferencia al emplear un valor de PQ adecuado para cada experimento (Williams *et al.*, 1979; Raine, 1983; Williams *et al.*, 1983; Platt y Harrison, 1986).

Los datos de oxígeno y nitratos en superficie durante los periodos de incubación presentaron una  $r^2 = 0.92$ , lo que sugiere que se puede utilizar un valor de PQ mayor que 1.25. Los valores de PQ calculados son cercanos a 2.3, sugiriendo que la principal fuente de nitrógeno es el ión nitrato.

Debido al proceso de mezcla, al efecto de mareas vivas y muertas y al incremento de nutrientes, las  $\text{P}^{\text{B}}$  en Puerto Don Juan fueron hasta cinco veces mayores que las de investigaciones de similar latitud en mar abierto del Pacífico (Sharp *et al.*, 1980; Kanda *et al.*, 1985). Para la parte norte de Bahía de los Ángeles, los máximos de  $\text{P}^{\text{B}}$  fueron una tercera parte menor que los reportados en este estudio (Canino-Herrera, 1989). Para la parte norte del Golfo de California, se han reportado  $\text{P}^{\text{B}}$  similares para verano e invierno (Álvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, 1988). Nuestros valores de  $\text{P}^{\text{B}}$  fueron similares a los de Bahía San Quintín obtenidos durante eventos de surgencia y mayores a los obtenidos

1983; Williams *et al.*, 1983; Platt and Harrison, 1986).

The oxygen and nitrate data at the surface during the incubation periods presented an  $r^2 = 0.92$ , suggesting that a PQ value greater than 1.25 can be used. The PQ values calculated are close to 2.3, suggesting that ion nitrate is the principal source of nitrogen.

Due to the mixing process, to the effect of neap and spring tides and to the increase in nutrients, the  $\text{P}^{\text{B}}$  values in Puerto Don Juan were up to five times greater than those of studies at similar latitudes in the open Pacific (Sharp *et al.*, 1980; Kanda *et al.*, 1985). The  $\text{P}^{\text{B}}$  maximums for northern Bahía de los Ángeles were one third less than those reported in this study (Canino-Herrera, 1989). For the northern Gulf of California, similar  $\text{P}^{\text{B}}$  values have been reported during the summer and winter (Álvarez-Borrego and Gaxiola-Castro, 1988). Our  $\text{P}^{\text{B}}$  values were similar to those obtained at San Quintín Bay during upwelling events and greater than those obtained during El Niño (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982; Gaxiola-Castro and Álvarez-Borrego, 1984; Torres-Moye and Álvarez-Borrego, 1987; Silva-Cota and Álvarez-Borrego, 1988). There is a noticeable similarity between the results of this study and those of Gaxiola-Castro and Álvarez-Borrego (1984), with regard to the theoretical maximum for  $\text{P}^{\text{B}}$  of  $25 \text{ mgC}\cdot\text{mgChla}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  (Falkowski, 1981).

It can be inferred that the coastal lagoon of Puerto Don Juan is notably influenced by the concentration of nutrients from Ballenas Channel, principally nitrates and silicates, during periods of spring tides. Furthermore, there is an increase in POP during neap tides. It can be assumed from the subsaturation of oxygen in more than 70% of the data obtained that this is an area of high oxygen consumption and  $\text{CO}_2$  production. It is inferred from the POP results and the calculated PQ that photosynthesis primarily uses nitrates.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

We thank CONACYT and the Secretaría de Educación Pública (SEP 85-01-119) for the support to the postgraduate program and the



durante eventos de El Niño (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982; Gaxiola-Castro y Álvarez-Borrego, 1984; Torres-Moye y Álvarez-Borrego, 1987; Silva-Cota y Álvarez-Borrego, 1988). Destaca la similitud de los resultados de este estudio con los de Gaxiola-Castro y Álvarez-Borrego (1984) cercano al máximo teórico de  $P^B$  de  $25 \text{ mgC} \cdot \text{mgCl}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  (Falkowski, 1981).

De lo anterior, se deduce que Puerto Don Juan es una laguna costera que tiene una influencia notoria en la concentración de nutrientes provenientes del Canal de Ballenas, principalmente nitratos y silicatos durante los periodos de mareas vivas. Además, se presenta un incremento de POP durante mareas muertas. La subsaturación de oxígeno en más del 70% de los datos obtenidos hace suponer que se trata de una zona de alto consumo de oxígeno y producción de  $\text{CO}_2$ . Para los resultados de POP y el PQ calculado, se deduce que la fotosíntesis utiliza principalmente los nitratos.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al CONACYT y a la Secretaría de Educación Pública (registro SEP 85-01-119) el apoyo al posgrado y al proyecto de investigación "Potencial productivo de las lagunas costeras de Baja California", realizado en la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC.

#### REFERENCIAS

Álvarez-Borrego, S. (1983). Gulf of California. In: B.H. Ketchum (ed.), *Estuaries and Enclosed Seas*. Elsevier Sci. Pub. Co., Amsterdam, pp. 427-429.

Álvarez-Borrego, S. and Gaxiola-Castro, G. (1988). Photosynthetic parameters of northern Gulf of California phytoplankton. *Continental Shelf Res.*, 8(1): 34-47.

Álvarez-Borrego, S. and Lara-Lara, J.R. (1991). The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. In: B.R.T. Simons and J.P. Dauphin (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. AAPG Mem., 47: 555-567.

research project "Potencial productivo de las lagunas costeras de Baja California", conducted at the Facultad de Ciencias Marinas of the UABC.

English translation by Jennifer Davis.

Álvarez-Borrego, S., Rivera, J.A., Gaxiola-Castro, G., Acosta-Ruiz, M.J. y Schwartzlose, R.A. (1978). Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 5(2): 53-71.

Álvarez-Sánchez, L.G., Badan-Dangon, A. and Robles-Pacheco, J.M. (1985). Lagrangian observations of near-surface currents in Ballenas Channel. *CALCOFI Rep.*, XXV: 35-40.

Azam, F., Fenchel, T., Field, J.G., Gray, J.J., Meyer-Reil, L.A. and Thingstad, F. (1983). The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 10: 257-263.

Badan-Dangon, A., Koblinsky, C.J. and Baumgartner, T. (1985). Spring and summer in the Gulf of California: Observations of surface thermal patterns. *Oceanol. Acta*, 8: 13-22.

Bruno, F.S., Staker, R.D. and Sharma, G.M. (1980). Dynamics of phytoplankton productivity in Peconic Bay Estuary, Long Island. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 10: 247-163.

Bryan, J.R., Riley, J.P. and Williams, P.J. leB. (1976). A Winkler procedure for making precise measurements of oxygen concentration for productivity and related studies. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 21: 191-197.

Cajal-Medrano, R., Mitrani-Abenchuchan, E. y Castro-Delgado, M. (1987). Detector fotoelectrónico de alta precisión para titulaciones de oxígeno disuelto. En: J.L. Granados-Gallegos (ed.), *Resúmenes del VII Congreso Nacional de Oceanografía*. INP, Ensenada, B.C.

Canino-Herrera, R. (1989). Variabilidad de productividad primaria, seston y clorofila *a* en Bahía de los Ángeles, B.C., verano 1986. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México, 53 pp.

- Caperon, J. and Meyer, J. (1972). Nitrogen-limited growth of marine phytoplankton. II. Uptake kinetics and their role in nutrient limited growth of phytoplankton. *Deep-Sea Res.*, 19: 619-632.
- Conway, H.L. (1977). Interactions of inorganic nitrogen in the uptake and assimilation by marine phytoplankton. *Mar. Biol.*, 39: 221-232.
- Droop, M.R. (1973). Some thoughts on nutrient limitation in algae. *J. Phycol.*, 9: 264-272.
- Dugdale, R.C. (1967). Nutrient limitation in the sea: dynamics, identification, and significance. *Limnol. Oceanogr.*, 12: 685-695.
- Eppley, R.W., Roger, J.N. and McCarthy, J.J. (1969). Half saturation constant for uptake of nitrate and ammonium by marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 14(6): 912-920.
- Falkowski, G. (1981). Light-shade adaptation and assimilation numbers. *J. Plankton Res.*, 3(2): 203-216.
- Fineko, Z.Z. and Krupatkina-Akinina (1974). Effect of inorganic phosphorus on the growth rate of diatoms. *Mar. Biol.*, 26: 193-201.
- Gaxiola-Castro, G. y Álvarez-Borrego, S. (1984). Relación fotosíntesis-irradiancia en el fitoplancton de aguas costeras del noroeste de Baja California. *Ciencias Marinas*, 10(3): 53-66.
- Gaxiola-Castro, G., Álvarez-Borrego, S. y Schwartzlose, R.A. (1978). Sistema del bióxido de carbono en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 5(2): 25-40.
- Gilmartin, M. and Revelante, N. (1978). The phytoplankton characteristics of the Barrier Island lagoons of the Gulf of California. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 7(1): 29-47.
- Ibarra-Sañudo, S. (1988). Serie de tiempo de variables hidrológicas al norte de Bahía de los Ángeles, B.C., en condiciones de verano. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México, 58 pp.
- Kanda, J., Saino, T. and Hattori, A. (1985). Nitrogen uptake by natural populations of phytoplankton and primary production in the Pacific Ocean: Regional variability of uptake capacity. *Limnol. Oceanogr.*, 30(5): 987-999.
- Lara-Lara, J.R., Álvarez-Borrego, S. and Small, L.F. (1980). Variability and tidal exchange of ecological properties in a coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 11: 613-637.
- López-Valdéz, C. (1989). Variabilidad hidrológica en Bahía de los Ángeles, B.C., en condiciones de invierno. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México, 58 pp.
- Millán-Núñez, R. y Álvarez-Borrego, S. (1978). Ecuaciones espectrofotométricas tricromáticas para la determinación de clorofilas *a*, *b* y *c* y sus feofitinas. *Ciencias Marinas*, 5(1): 47-55.
- Millán-Núñez, R., Álvarez-Borrego, S. and Nelson, D.M. (1982). Effects of physical phenomena on the distribution of nutrients and phytoplankton productivity in a coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 15: 317-335.
- Morales-Zamorano, L.A., Cajal-Medrano, R., Orellana-Cepeda, E. and Jiménez-Pérez, L.C. (1991). Effect of tidal dynamics on a planktonic community in a coastal lagoon of Baja California, Mexico. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 78: 229-239.
- Paasche, E. (1975). Growth of the plankton diatom *Thalassiosira nordenskiöldii* Cleve at low silicate concentrations. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 18(2): 173-183.
- Painchaud, J. and Therriault, J.C. (1989). Relationships between bacteria, phytoplankton and particulate organic carbon in the upper St. Lawrence Estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 56: 301-311.
- Peterson, B.J. (1984). Synthesis of carbon stocks and flows in the open ocean mixed layer. In: J.E. Hobbie and P.J. leB. Williams (eds.), *Heterotrophic Activity in the Sea*. Plenum Press, New York.
- Platt, T. and Harrison, W.G. (1986). Reconciliation of carbon and oxygen fluxes in the upper ocean. *Deep Sea Res.*, 33(2): 273-276.
- Platt, T., Harrison, W.G., Lewis, M.R., Li, W.K., Sathyendranath, S., Smith, R.E. and Vezina, A.F. (1989). Biological production of the oceans: the case for a consensus. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 52: 77-88.
- Pomeroy, L.R. (1984). Microbial processes in the sea: Diversity in nature and science. In: J.E. Hobbie and P.J. leB. Williams (eds.),

- Heterotrophic Activity in the Sea. IV: 15 Marine Sciences. NATO Conference Series. Plenum Press, New York, pp. 1-23.
- Raine, R.C.T. (1983) The effect of nitrogen supply on the photosynthetic quotient of natural phytoplankton assemblages. *Botanica Marina*, XXVI: 417-423.
- Richards, F.A. and Thompson, T.G. (1952). The estimation and characterization of plankton populations by pigment analysis. II. Spectrophotometric method for the estimation of plankton pigments. *J. Mar. Res.*, 11: 156-172.
- Roden, G.I. (1959). Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pac. Sci.*, XII(2): 21-45.
- Roden, G.I. and Groves, G.W. (1959). Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. *J. Mar. Res.*, 18: 10-35.
- Ryther, J.H. (1963). In: M.N. Hill (ed.), *The Sea*. Interscience, New York, 347 pp.
- Santamaría-del Ángel, E.M. (1988). Variación de la estructura fitoplanctónica en Puerto Don Juan, Bahía de los Ángeles, Baja California, México. Verano de 1986. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México, 153 pp.
- Sharp, J.H., Perry, M.J., Renger, E.A. and Eppley, R.W. (1980). Phytoplankton rate processes in the oligotrophic waters of the central North Pacific Ocean. *J. Plankton Res.*, 2: 335-353.
- Silva-Cota, S. and Álvarez-Borrego, S. (1988). The "El Niño" effect on the phytoplankton of a north-western Baja California coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 27: 109-115.
- Steemann-Nielsen, E. (1952). The use of radioactive carbon ( $^{14}\text{C}$ ) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Int. Explor. Mer*, 18: 117-140
- Strickland, J.H.D. (1960). Measuring the production of marine phytoplankton. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, 122: 172 pp.
- Strickland, J.H.D. and Parsons, T.R. (1972). A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, 167: 311 pp.
- Torres-Moye, G. and Álvarez-Borrego, S. (1987). Effects of the 1984 El Niño on the summer phytoplankton of a Baja California upwelling zone. *J. Geophys. Res. Plankton Res.*, 92(C13): 14383-14386.
- UNESCO (1983). Los ecosistemas costeros de América Latina y el Caribe. Los objetivos, prioridades y actividades del proyecto UNESCO-COMAR para la región de América Latina y el Caribe. Caracas, Venezuela, 15-19 noviembre de 1982. UNESCO Reports in Marine Science, No. 24: 54 pp.
- Valdez-Holguín, J.E. y Lara-Lara, J.R. (1987). Productividad primaria en el Golfo de California: efectos del evento El Niño 1982-1983. *Ciencias Marinas*, 13(2): 34-50.
- Williams, P.J. leB. (1981). Incorporation of microheterotrophic processes into the classical paradigm of the planktonic food web. 15 Simposium Europeo de Biología Marina. Kiel, Alemania. *Kieler Meeresforsch.*, 5: 1.
- Williams, P.J. leB., Raine, R.C.T. and Bryan, J.R. (1979). Agreement between the  $^{14}\text{C}$  and oxygen methods of measuring phytoplankton production: reassessment of the photosynthetic quotient. *Oceanol. Acta*, 2: 411-416.
- Williams, P.J. leB., Heinemann, K.R., Marra, J. and Purdie, D.A. (1983). Comparison of  $^{14}\text{C}$  and  $\text{O}_2$  measurements of phytoplankton production in oligotrophic waters. *Nature* (1 Sept. 1983), 305: 49-50.
- Zeitzschel, B. (1969). Primary productivity in the Gulf of California. *Mar. Biol.*, 3(3): 201-207.
- Zirino, A. and Lieberman, S.H. (1985). pH-temperature relationship in the Gulf of California. In: A. Zirino (ed.), *Mapping Strategies in Chemical Oceanography*. Am. Chem. Soc. Washington, D.C. *Advances in Chemistry Ser.*, 209: 393-408.